

0- 779720

На правах рукописи



АЮПОВ ТИМУР АНВАРОВИЧ

**УСТРОЙСТВА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ
НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ НЕОДНОРОДНЫХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ
ДЛЯ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
В КАНАЛЕ С КОАКСИАЛЬНОЙ СТРУКТУРОЙ**

Специальность 05.12.07 - «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2009

Работа выполнена на кафедре Радиоэлектронных и телекоммуникационных
систем Казанского государственного технического университета
им. А.Н. Туполева.

Научный кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
руководитель: РТС, КГТУ им. А.Н. Туполева
Воробьев Николай Германович

Официальные доктор технических наук, профессор Рязанского
оппоненты: государственного радиотехнического университета,
Маторин Александр Васильевич

доктор технических наук, профессор Казанского
государственного технического университета
им. А.Н. Туполева,
Анфиногентов Владимир Иванович

Ведущая
организация: ФГУП «НПП «Исток», г. Фрязино, Московская область

Защита состоится на заседании диссертационного совета Д 212.079.04 при
Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева
18 декабря 2009 г. в 15 часов по адресу: г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 31.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью
организации, просим выслать по адресу 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса,
д. 10 на имя ученого секретаря.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского
государственного технического университета им. А.Н. Туполева по адресу:
420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10

С авторефератом диссертации можно ознакомиться на сайте КГТУ
им. А.Н. Туполева www.kai.ru.

Автореферат разослан "15" ноября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, профессор



В.Р. Линдваль



1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. На сегодняшний день микроволновые (МВ) технологии широко применяются для сушки, стерилизации и обеззараживания продукции, нагревания и изменения свойств веществ, воздействия на биологические объекты, и область их применения постоянно расширяется.

По сведениям, приведенным в литературе, в большинстве случаев для эффективной обработки СВЧ-материалов требуется обеспечение равномерного распределения МВ энергии по их объему. Это является одной из серьезных проблем, вызванных затуханием электромагнитного (ЭМ) поля в обрабатываемых материалах, которые обычно представляют собой среды с электромагнитными потерями. Неравномерность распределения поля значительно снижает качество и эффективность микроволнового воздействия.

Наиболее распространенными способами повышения равномерности являются: перемещение материала в ЭМ поле, использование диссекторов, облучение среды двумя встречно направленными потоками электромагнитного излучения, использование многоэлементных систем излучателей, волноводов сложных сечений с пропусканием обрабатываемого материала в области емкостного зазора, применение частично заполненных волноводов и МВ камер с многомодовым возбуждением.

Использование перечисленных способов при обработке больших объемов материала в чанах, бочках и отстойниках, при высоких плотностях энергии оказывается сложно реализуемым или малоэффективным. Именно поэтому МВ обработку жидких и сыпучих материалов наиболее целесообразно проводить в потоке по трубе, где возможно обеспечить зону равномерного распределения ЭМ поля, через которую пропускаются любые объемы обрабатываемого материала. Длина этой зоны определяет необходимое время микроволнового воздействия. Обычно для реализации такого процесса поток обрабатываемого материала пропускают по радиопрозрачной трубе через СВЧ-камеру или волновод, однако проблема неравномерности обработки в этих случаях сохраняется. В то же время можно обеспечить равномерную обработку путем размещения внутри трубы распределенного источника СВЧ-излучения, при этом в трубе формируется канал МВ обработки с коаксиальной структурой, по которому перемещается обрабатываемый материал. Решению этой задачи посвящена данная работа.

Одним из основных эффектов МВ воздействия является нагрев, поэтому часто полагается, что если удастся быстро разогреть материал до нужной температуры с более высоким КПД, чем при традиционном нагреве, то МВ обработка эффективна. Это является не совсем верным, так как даже в случае неравномерного распределения ЭМ поля происходит выравнивание температуры за счет теплообмена особенно в жидких материалах. При этом другие МВ эффекты (ускорение химических реакций, разрушение эмульсий, нагрев и сушка веществ с низкой теплопроводностью) реализуются лишь частично. Из этого следует, что повышение эффективности МВ воздействия в технологических процессах напрямую связано с повышением равномерности распределения ЭМ поля в обрабатываемом материале. При этом под эффективностью понимается однородность воздействия ЭМ поля определенной

интенсивности и длительности на обрабатываемый материал. Длительность обработки связана с тем, что большинство химических и физических реакций являются инерционными, а МВ воздействие необходимо в течение всего времени протекания реакции.

При обработке в трубе чем выше скорость потока, тем больше длина участка, на котором необходимо обеспечить равномерное распределение ЭМ поля. Сложность обеспечения такого распределения заключается в том, что в средах с потерями (которыми в большинстве случаев являются обрабатываемые материалы) ЭМ волна затухает. Кроме того, при распространении ЭМ волн в трубе (которая в этом случае для ЭМ поля является волноводом) возникают частотные ограничения, связанные с условиями распространения энергии в волноводе, что в частности не позволяет реализовать МВ процесс в трубах заданного сечения обычными локальными источниками излучения.

Разработкой вопросов МВ воздействия на поток в трубе активно занимаются различные коллективы, в нашей стране, в частности, следует отметить работы коллективов НИЦ ПРЭ КГТУ им. А.Н. Туполева, ФГУП «НПП Исток», ООО «БИГ-96» и др.

Несмотря на то, что в целом эти исследования имеют положительные результаты, предлагаемые в них конструктивные решения ввода СВЧ-энергии в обрабатываемый материал в трубопроводе не полностью отвечают перечисленным требованиям обеспечения равномерности МВ воздействия, например, патенты РФ №2196227, №40925, патенты США №4582629, №4853507 либо имеют сложную конструкцию, например, такие как патент РФ №2338775.

Таким образом, задача реализации равномерного распределения МВ энергии, обеспечивающего однородность микроволнового воздействия на поток диссипативной среды по интенсивности и длительности, является **актуальной**.

Предметом исследования является формирование распределения электромагнитного поля для микроволновой обработки потока жидких и сыпучих сред в коаксиальном канале.

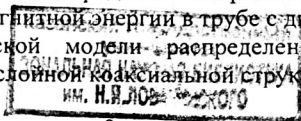
Объект исследования – устройства распределения микроволновой энергии в коаксиальном канале с диссипативным заполнением на основе открытых линий передачи.

Цель работы – повышение эффективности микроволнового воздействия на поток жидких и сыпучих материалов посредством повышения равномерности распределения электромагнитного поля в трубе с коаксиальным каналом микроволновой обработки.

Основной задачей научных исследований является разработка способа, устройств и математических моделей распределения электромагнитного поля открытыми неоднородными линиями передачи в трубе с коаксиальным каналом для микроволновой обработки потока жидких или сыпучих материалов.

Указанная задача включает в себя ряд частных задач:

1. Разработка открытых неоднородных направляющих структур для распределения электромагнитной энергии в трубе с диссипативной средой.
2. Разработка математической модели распределения электромагнитной энергии в канале с многослойной коаксиальной структурой.



3. Оценка распределения теплового воздействия ЭМ поля в трубе с многослойной коаксиальной структурой на поток диссипативной среды и элементы конструкции коаксиального канала.
4. Экспериментальное исследование параметров направляющих структур в трубе с диссипативной средой.
5. Применение разработанных устройств в микроволновых установках.

Методы исследования. Для достижения поставленных целей в работе использованы математические методы прикладной электродинамики, методы решения дифференциальных уравнений, метод конечных разностей для решения уравнения теплового баланса. При проведении расчетов применены пакеты прикладных программ Mathcad и CST Microwave Studio.

Достоверность и обоснованность результатов определяются корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам; совпадением теоретических результатов с данными экспериментов, результатами эксплуатации созданных устройств.

Научная новизна полученных результатов:

1. Разработка способа распределения микроволновой энергии в трубе с диссипативной средой на основе неоднородных открытых линий передачи.
2. Построение математической модели распределения электромагнитного поля в трубе с поперечно-неоднородной коаксиальной структурой, учитывающей продольную компоненту электрического поля.
3. Разработка открытых неоднородных направляющих структур для распределения электромагнитной энергии в трубе с диссипативной средой.
4. Реализация предложенного способа в экспериментальных микроволновых установках для: 1) физического моделирования технологического процесса разрушения стойких водонефтяных эмульсий в потоке по трубе под действием микроволновой энергии; 2) регенерации силикагеля в осушительной колонне в технологическом процессе осушки природного газа для газотурбинных двигателей газоперекачивающих станций.

Практическая ценность результатов работы:

1. Разработка способа распределения электромагнитной энергии для реализации микроволновой обработки потока жидких или сыпучих сред в трубе с коаксиальным каналом.
2. Выработка рекомендаций по проектированию и созданию устройств распределения электромагнитной энергии в трубе на основе открытых неоднородных линий передачи для микроволновых установок.
3. Создание экспериментальных микроволновых установок для:
 - 1) моделирования технологических процессов микроволновой обработки стойких водонефтяных эмульсий в потоке по трубе;
 - 2) регенерации силикагеля в осушительной колонне в технологическом процессе осушки природного газа для газотурбинных двигателей газоперекачивающих станций.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской НПК «Авиакосмические технологии и оборудование» Казань, 2004, 2008 г.г.; III и VI Международных НТК «Физика и технические приложения волновых

процессов», Волгоград, 2004г., Казань, 2007г., Санкт-Петербург 2009г.; Международных молодежных НК XII-XV «Туполевские чтения», Казань, 2004-2007 г.г., XII Международной НТК студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика", 2006 г.; 18-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии Крымико'08» 2008 г.

Получены награды и дипломы на следующих конкурсах: VI Московский международный салон инноваций и технологий, Москва, 2006; конкурс программы "Старт06" государственного Фонда содействия развития малых форм предприятий в научно-технической сфере, 2006 г.; Республиканский конкурс РТ "Лучшее изобретение года", 2005г.; Республиканский конкурс "50 лучших инновационных идей Республики Татарстан", Казань 2007, 2008 г.г.; Конкурс «Идея – 1000», проводимый совместно государственным Фондом содействия развития малых форм предприятий в научно-технической сфере и Инвестиционно-венчурным фондом РТ 2007 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 28 научных работ, в том числе 3 патента на изобретение (из них 2 на способ), 2 патента на полезную модель, 1 научно-технический отчет, 9 тезисов докладов и 6 публикаций в материалах конференций, 4 публикации в различных сборниках, 3 статьи в журналах, в том числе 1 из них в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК.

Использование результатов диссертации и пути дальнейшей реализации. Результаты работы использовались при выполнении госконтракта №4176р/6586 от 26 июня 2006 г. на выполнение НИОКР по теме: "Разработка и создание экспериментальной микроволновой установки разделения потока водонефтяной эмульсии"; госконтракта с АН РТ №06-6.7-80/2006 (Г) от 10.11.2006 по теме: «Разработка метода распределения электромагнитных и тепловых полей в потоке диссипативной среды по трубопроводу и его реализация в микроволновой технологии разделения водонефтяной смеси, интегрированной с действующей технологией по подготовке товарной нефти»; При выполнении договора с ЗАО «ТАТЕХ» на создание экспериментальной микроволновой установки для моделирования технологических процессов по разделению водонефтяной эмульсии в трубопроводе.

Кроме того, разработанная экспериментальная установка по разделению водонефтяных эмульсий использовалась в работах ОАО «ВНИИУС» по обессоливанию высоковязких нефтей.

Разработанные математические модели и рекомендации использовались в учебном процессе ИРЭТ КГТУ им. А.Н.Туполева.

Пути дальнейшей реализации связаны с разработкой и проектированием микроволновых устройств для технологических процессов в различных областях народного хозяйства.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Способ распределения микроволновой энергии открытыми линиями передачи в неоднородных диссипативных средах в трубе;
2. Результаты моделирования распределения электромагнитных и тепловых полей открытыми линиями передачи в трубе с диссипативной средой.

3. Результаты экспериментальных исследований по распределению микроволновой энергии в трубах с различными открытыми направляющими структурами.
4. Реализация предложенного способа в экспериментальных микроволновых установках: 1) для физического моделирования процесса разрушения стойких водонефтяных эмульсий в потоке по трубопроводу; 2) для регенерации силикагеля в осушительной колонне для газотурбинных двигателей газоперекачивающих станций.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 113 наименований, и приложений. Работа без приложений изложена на 142 страницах машинописного текста, включая 81 рисунок и 10 таблиц.

Сведения о личном вкладе автора. Автором разрабатывалось применение способа распределения электромагнитной энергии открытыми линиями передачи в диссипативных средах для ввода и распределения СВЧ-поля в трубе. Разработка математических моделей распределения ЭМ и тепловых полей в трубе с поперечно-неоднородной коаксиальной структурой. Принимал непосредственное участие в разработке и создании экспериментальных установок, подготовке и проведении экспериментальных исследований. Автором проведены обработка и анализ полученных расчетных и экспериментальных результатов, сделаны выводы, на основании которых предложены рекомендации по проектированию открытых неоднородных направляющих структур для МВ обработки потока жидких и сыпучих материалов в трубах.

Автор выражает искреннюю благодарность профессору, д.т.н. О.Ш. Даутову за консультации и советы, а также коллективам ОАО «ВНИИУС» и ООО «НПП «Авиагаз-Союз+» за поддержку, оказанную при выполнении работы.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость результатов диссертационной работы, изложены основные научные положения, выносимые на защиту. Показаны основные достоинства использования сверхвысокочастотных технологий для обработки различных материалов в потоке по трубе и возникающие при этом проблемы. Определены задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной в данной диссертационной работе цели, указывается внедрение результатов.

В первой главе приведен обзор применения МВ технологий в различных областях народного хозяйства.

Выявлены специфические особенности МВ воздействия на вещества и его преимущества по сравнению с другими видами обработки. Показано, что основным параметром, определяющим эффективность микроволнового процесса, является однородность МВ воздействия для всей массы обрабатываемого материала по интенсивности и длительности. Это требует высокой равномерности распределения ЭМ поля в веществе.

Обосновано, что МВ обработку жидких и сыпучих сред наиболее целесообразно проводить в потоке по коаксиальному каналу, образованному трубой и размещенным в ней распределенным источником СВЧ-энергии.

Выявлено, что существующие устройства МВ обработки материалов в потоке по трубе не полностью удовлетворяют перечисленным требованиям эффективной МВ обработки потока жидких и сыпучих материалов в трубе, позволяющей реализовать все преимущества МВ воздействия. Таким образом, для реализации эффективной МВ обработки материалов в трубе необходимо разработать устройство, позволяющее распределять ЭМ энергию с заданной неравномерностью на отрезке трубы заданной длины. Такие устройства должны адаптироваться к трубам любого поперечного сечения независимо от частотного диапазона проведения МВ обработки.

Во второй главе предложен способ формирования распределения ЭМ поля в диссипативных средах с помощью неоднородных открытых и полукрытых линий передачи, например, диэлектрических волноводов, изолированных однопроводных и многопроводных линий, полосковых линий, открытых нерегулярных линий передачи, полые волноводы из сетчатых структур и т.д. Такие линии, помещенные в диэлектрический обтекатель, размещаются в обрабатываемой среде и взаимодействуют с ней посредством своего внешнего поля. Параметры этого взаимодействия зависят от конструкции и типа линии передачи, геометрии ее поперечного сечения и свойств окружающей среды. Общим для этих направляющих структур является наличие внешней радиопрозрачной оболочки (обтекателя), отделяющей линию от обрабатываемой среды.

При размещении такой открытой линии передачи в трубе она образует с ним неоднородную многослойную коаксиальную структуру (коаксиальный канал микроволновой обработки). По такой схеме хорошо реализуются: микроволновая обработка жидких и сыпучих сред в трубах практически в любом диапазоне частот (ВЧ, СВЧ и КВЧ) независимо от размеров их поперечного сечения.

Предложенный способ распределения энергии является эффективным решением для нагрева и сушки неподвижного материала с низкой теплопроводностью в замкнутых цилиндрических камерах, где для проведения эффективной МВ обработки требуется повышенная равномерность распределения ЭМ поля, например, регенерация силикагелей и цеолитов в адсорбционных колоннах осушителей газов.

Кроме того, такой способ распределения энергии востребован в процессах МВ обработки жидких материалов в потоке по трубе. Например, МВ обработка крови в медицине или сепарация водонефтяных эмульсий под воздействием МВ энергии в процессах обезвоживания и обессоливания нефти. На рис. 1 – 3 приведены примеры открытых линий передачи, размещаемых в трубе и образующих неоднородные коаксиальные направляющие структуры, состоящие из трубы 3 с обрабатываемой средой 4, СВЧ тракта 2, диэлектрического обтекателя 5, открытой линии передачи 6, 7, 8.

Исходным вариантом для анализа приведенных устройств в общем случае является поперечно-неоднородная коаксиальная структура (рис.4), состоящая из

центрального проводника в виде открытой линии передачи с обтекателем, обрабатываемого диссипативного материала и трубы. Распределение ЭМ энергии вдоль трубы в такой конструкции обеспечивается изменением погонных параметров неоднородной коаксиальной структуры, с открытой линией передачи, приводящих к изменению связи открытой линии по внешнему ЭМ полю с обрабатываемой средой. Отличительным признаком данных устройств распределения энергии от существующих является размещение открытой неоднородной линии передачи с радиопрозрачным обтекателем в обрабатываемой среде внутри трубы, при этом образуется канал МВ обработки с многослойной коаксиальной структурой. Это позволяет равномерно распределить ЭМ энергию в трубах любых диаметров (в том числе на частотах запредельных для данного сечения трубы); проводить обработку материалов с большими и малыми электромагнитными потерями в трубах с низкой проводимостью стенок, а также формировать требуемое распределение ЭМ энергии вдоль трубы при использовании минимального числа источников СВЧ-энергии.

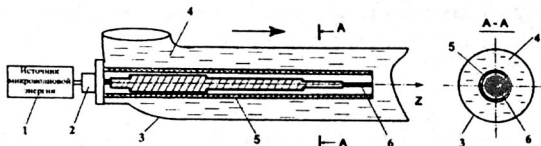


Рис. 1 Коаксиальная направляющая структура образованная однопроводной линией передачи в трубе

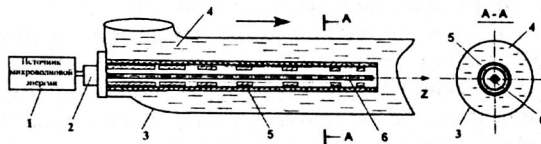


Рис. 2 Коаксиальная линия с перфорированным внешним проводником

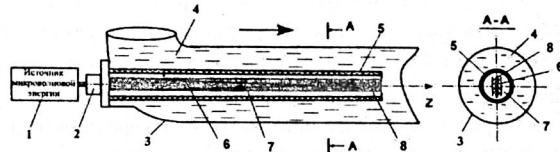


Рис. 3 Неоднородная коаксиально-полосковая направляющая структура

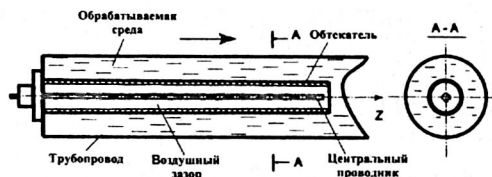


Рис. 4 Поперечно-неоднородная коаксиальная структура

Для формирования распределения электромагнитного поля в коаксиальных структурах, образованных, трубой и открытой неоднородной линией передачи, могут использоваться различные механизмы. Одним из них является изменение волновых сопротивлений вдоль такой структуры. На практике это может быть легко реализовано в виде коаксиального устройства с центральным проводником переменного сечения (рис. 1) или с центральным проводником в виде спирали с переменным шагом намотки.

Для сред с малыми потерями эта задача в канале микроволновой обработки с однородным заполнением рассмотрена на основе неоднородных телеграфных уравнений и рекуррентных процедур, связывающих напряжения и токи на отдельных участках линии:

$$\frac{d^2 U}{dz^2} - \frac{1}{Z} \frac{dZ}{dz} \frac{dU}{dz} + k^2 U = 0, \quad (1)$$

где $k^2 = \omega^2 \left(L - i \frac{R}{\omega} \right) \left(C - i \frac{G}{\omega} \right)$, $L(z)$, $R(z)$, $C(z)$, $G(z)$ – погонные параметры линии.

Моделирование задачи сведено к решению однородных линейных дифференциальных уравнений (1) при кусочно-постоянной аппроксимации погонных параметров нерегулярной линии.

Отличие методики расчета напряжений и токов на отдельных участках такой линии, примененной в разработанной модели, заключается в использовании рекуррентной формы расчета, предложенной О.Ш. Даутовым для определения электромагнитных полей в слоистых средах. Это позволяет избежать традиционно описываемых в литературе громоздких матричных вычислений, ведущих к накоплению погрешности.

При этом продольно-неоднородная линия с параметром $Z(z), Y(z), K(z)$ представлялась в виде n однородных отрезков ($j = \overline{0, n}$) с погонными параметрами $Z_j = Z(z_j)$, $Y_j = Y(z_j)$, $K_j = K(z_j)$. С учетом условия непрерывности распределения напряжений и токов на стыках линии посредством рекуррентной процедуры последовательно находят коэффициенты отражения и прохождения на границах каждого из n отрезков, начиная с известной нагрузки:

$$U_{j+1}(z) = U_{otr} T_{0,j+1} \left(e^{-ik_{j+1}(z-z_j)} + R_{j+1,l} e^{ik_{j+1}(z-z_j)} \right), \quad (2)$$

$$J_{j+1}(z) = \frac{U_{otr} T_{0,j+1}}{W_{j+1}} \left(e^{-ik_{j+1}(z-z_j)} - R_{j+1,l} e^{ik_{j+1}(z-z_j)} \right), \quad (3)$$

где $T_{0,j+1} = \left\{ \prod_{m=0}^{m=j} T_{jm,m+1} \right\} e^{-i \sum_{m=1}^{m=j} k_m d_m}$; $T_{j,j+1} = \frac{1}{\alpha_{j,j+1} (1 + R_{j,j+1} R_{j+1,l})}$ – коэффициенты

прохождения; $R_{jl} = \frac{R_{j,j+1} + R_{j+1,l}}{1 + R_{j,j+1} R_{j+1,l}} e^{-i2k_j d_j}$; $R_{j,j+1} = \frac{\beta_{j,j+1}}{\alpha_{j,j+1}} = \frac{W_{j+1} - W_j}{W_{j+1} + W_j}$;

$R_{jr} = R_{jl} e^{i2k_j d_j}$ – коэффициенты отражения.

Распределение напряженности поля в любом сечении на однородных участках линии находится по формуле:

$$\tilde{E}_j(z) = \bar{\rho}_0 \frac{U_j(z)}{\ln(a_j/b_j)} \cdot \frac{1}{\rho}, \quad (4)$$

где a_j и b_j – внутренний и внешний радиус коаксиальной линии на j -м отрезке.

Результаты расчетов продольно-неоднородных коаксиальных линий передачи приведены на рис. 5. На графиках представлено продольное распределение модуля напряженности электрического поля в однородной коаксиальной структуре – кривая 1 и продольно-нерегулярной – кривая 2, для различных вариантов среды заполнения линий. Длина линии $L = 1,4$ м, диаметр

внешнего проводника $D = 0,06$ м. Диаметр внутреннего проводника однородной линии $d = 0,026$ м, а центральный проводник неоднородной линии состоит из 10 равных по длине отрезков, диаметр которых изменяется в пределах $d = 0,026...0,044$ м, с шагом $\Delta = 0,002$ м. Частота возбуждения $f = 2450$ МГц. Для проверки адекватности разработанной математической модели проведено сравнение продольного распределения поля с распределением поля, полученным в программном пакете численного моделирования СВЧ-устройств CST Microwave Studio 2008 (рис. 5, а, б, в кривая 3). Проведенное сравнение показывает высокую степень совпадения получаемых результатов и их достоверность.

Как следует из графиков (рис. 5, а, б), для сред с малыми потерями ($\varepsilon > 1$, $\sigma < 3 \cdot 10^{-3}$) удастся снизить продольную неравномерность распределения поля или даже получить увеличение напряженности поля к концу линии. В средах с более значительными потерями распределение поля характеризуется значительным затуханием (рис. 5, в). При этом выигрыш в неравномерности распределения поля по сравнению с однородной коаксиальной линией составляет не более 13%, т.е. в среде со значительными потерями распределение поля мало зависит от формы поперечного сечения внутреннего проводника и изменений волновых сопротивлений. Таким образом, продольно-неоднородные коаксиальные структуры могут быть использованы в основном для формирования поля в средах с малыми потерями.

Для сред с более значительными потерями необходимо применять направляющие структуры, в которых формирование распределения энергии определяется величиной их связи по внешнему полю с обрабатываемой средой.

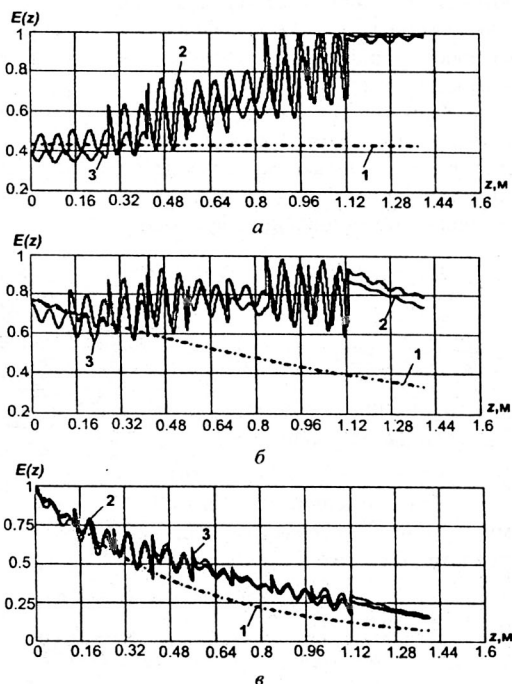


Рис. 5. Продольное распределение модуля напряженности электрического поля в однородной коаксиальной линии – кривая 1, в продольно-нерегулярной коаксиальной линии – кривые 2 (в разработанной математической модели) и 3 (в CST Microwave Studio). Частота возбуждения $f = 2450$ МГц, параметры сред заполняющих линий: а) - $\varepsilon = 1, \mu = 1, \delta = 1 \cdot 10^{-8}$, б) - $\varepsilon = 1, \mu = 1, \delta = 1 \cdot 10^{-2.5}$, в) - $\varepsilon = 1, \mu = 1, \delta = 1 \cdot 10^{-2}$

В качестве такой линии предложена поперечно-неоднородная коаксиальная структура (см. рис. 4), образованная трубой с обрабатываемой средой и размещенной в ней однопроводной линией в диэлектрическом обтекатель. Для решения задач микроволновой обработки в структуре поля такой системы необходимо знание распределения полного электрического поля, которое определяет распределение мощности тепловых источников в обрабатываемой среде.

При решении такой задачи для коаксиальной структуры с однородным многослойным заполнением (рис. 6), предполагалось, что в линии могут существовать только волны электрического типа с азимутальной симметрией. При этом продольная компонента поля в линии представлена с помощью скалярной потенциальной функции $\varphi(\rho)$:

$$E_z = \frac{(k^2 - \beta^2) \cdot \varphi(\rho)}{i\beta} e^{-i\beta z}, \quad (5)$$

$$\vec{E}_\perp = -\nabla_\perp \varphi(\rho), \quad (6)$$

$$\vec{H}_\perp = -\frac{\omega\epsilon}{\beta} [\vec{z}_0, \nabla_\perp \varphi(\rho)]. \quad (7)$$

Потенциал $\varphi(\rho)$ удовлетворяет волновому уравнению:

$$\nabla_\perp^2 \varphi + (k^2 + \beta^2) \varphi = 0. \quad (8)$$

Для отдельных областей многослойной структуры значения потенциалов:

$$\varphi_0 = \left\{ A_{0r} J_0(\sqrt{k_0^2 - \beta^2} \rho) + A_{0s} N_0(\sqrt{k_0^2 - \beta^2} \rho) \right\} \cdot e^{-i\beta z}, \quad r < \rho < r_1, \quad (9)$$

$$\varphi_1 = \left\{ A_{1r} J_0(\sqrt{k_1^2 - \beta^2} \rho) + A_{1s} N_0(\sqrt{k_1^2 - \beta^2} \rho) \right\} \cdot e^{-i\beta z}, \quad r_1 < \rho < r_2, \quad (10)$$

$$\varphi_2 = \left\{ A_{2r} J_0(\sqrt{k_2^2 - \beta^2} \rho) + A_{2s} N_0(\sqrt{k_2^2 - \beta^2} \rho) \right\} \cdot e^{-i\beta z}, \quad r_2 < \rho < R_1. \quad (11)$$

Значение β и коэффициентов A_u, A_v находятся из граничных условий. Пример расчета нормированного поперечного распределения поля в коаксиальной линии (рис. 6) приведен на рис. 7. Параметры линии: $\mu_0=\mu_1=\mu_2=1$; $\epsilon_0=1$; $\epsilon_1=2,5$; $\epsilon_2=30$; $\sigma_0=10^{-20}$ См/м; $\sigma_1=10^{-5}$ См/м; $\sigma_2=0,1$ См/м; $r_0=0,003$ м; $r_1=0,012$ м; $r_2=0,014$ м; $R_1=0,025$ м; $L=1,5$ м.

Кривая 2 (рис. 7) представляет собой нормированное поперечное распределение полного электрического поля в диэлектрическом обтекатель (зона I) и обрабатываемой диссипативной среде (зона II) исследуемой коаксиальной линии. Для сравнения приведено распределение, рассчитываемое без учета продольной компоненты (рис. 7, кривая 1).

Как следует из расчетов и приведенных графиков, учет продольной компоненты поля вносит значительную коррекцию в распределение поля, в неоднородной структуре канала МВ обработки. Это позволяет существенно уточнить распределение ЭМ поля в канале трубопровода и параметры теплового воздействия на обрабатываемую среду и элементы конструкции направляющей структуры.

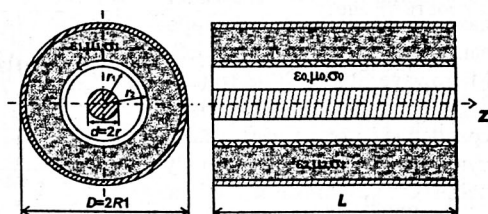


Рис. 6. Поперечное и продольное сечение исследуемой коаксиальной структуры

Сравнения результатов, полученных в разработанной математической модели (рис. 7, кривая 2) и в CST Microwave Studio (рис. 7, кривая 3), показывает, что имеется их хорошее совпадение и достоверность получаемых результатов.

Особенностью разработанных математических моделей является нахождение результата на основе аналитического решения, что повышает точность и скорость расчета в отличие существующих программ на основе численных методов.

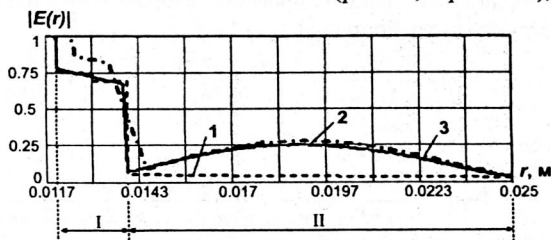


Рис. 7. Графики распределения электрического поля в поперечном сечении: 1 – без учета продольной компоненты; 2 – с учетом продольной компоненты, 3 – построена в программе CST Microwave Studio

Для оценки эффективности разрабатываемых устройств необходимо выбрать критерий, по которому можно было бы судить о достижении поставленной задачи – повышении равномерности распределения ЭМ поля в канале микроволновой обработки в трубе и, как следствие, повышении эффективности микроволновой обработки потока диссипативной среды. Таким критерием является коэффициент равномерности K_p ($0 \leq K_p \leq 1$). Он определяется как отношение интеграла модуля квадрата нормированной функции продольного распределения ЭМ поля в канале МВ обработки к длине направляющей структуры L :

$$K_p = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L |E^2(z)| dz. \quad (12)$$

При сравнении равномерности распределения поля в обрабатываемой среде в поперечно-неоднородной коаксиальной линии с распределением в однородной коаксиальной линии и круглом волноводе с волнами E_{01} и H_{11} по коэффициенту равномерности, найденному по формуле (12), соответственно получаем: $K_{pT_неоднород} = 0,874$, $K_{pT_однород} = 0,192$, $K_{pH11} = 0,187$, $K_{pE01} = 0,189$.

Таким образом, применение поперечно-неоднородных линий передачи позволяет существенно снизить неравномерность распределения электромагнитного поля в обрабатываемой среде в трубе.

В третьей главе для определения теплового воздействия на обрабатываемую среду и элементы конструкции направляющей структуры по найденному распределению электромагнитного поля рассмотрена тепловая задача по распределению поля температур в канале МВ обработки с коаксиальной структурой. Решение этой задачи позволяет обоснованнее определить требования к электрофизическим свойствам диэлектрического обтекателя.

Рассмотрен поток жидкой среды в кольцевом зазоре, ограниченном внешней металлической трубой с радиусом R_1 и внутренней диэлектрической трубой с радиусом r_2 , по которому в ламинарном режиме (число Рейнольдса $Re < 2000$) протекает обрабатываемая жидкость (см. рис. 6). Для решения

уравнения теплопроводности из уравнения Навье - Стокса в цилиндрических координатах найден профиль скорости в кольцевом канале коаксиальной структуры трубопровода:

$$w(r) = -\frac{\Delta p_{mp}}{4 \cdot l \cdot \mu_B} \left(r^2 - \frac{(r_2^2 - R_1^2)}{\ln(r_2 / R_1)} \ln(r) - r_2^2 + \frac{(r_2^2 - R_1^2) \ln(r_2)}{\ln(r_2 / R_1)} \right), \quad (13)$$

где:

$$\Delta p_{mp} = \frac{8 \cdot \mu_B \cdot l \cdot Q \cdot \ln(r_2 / R_1)}{\pi(R_1^4 \ln(r_2) - R_1^4 \ln(R_1) - 2r_2^2 R_1^2 + R_1^4 - r_2^4 \ln(r_2) + r_2^4 \ln(R_1) + r_2^4)}, \quad (14)$$

Q – расход жидкости, μ_B – динамический коэффициент вязкости.

При математическом моделировании СВЧ-нагрева в трубе предполагалось, что теплофизические свойства обрабатываемой среды не зависят от температуры, функция тепловых потерь не зависит от координаты φ (это условие выполняется для распределения поля с осевой симметрией), и переносом теплоты вдоль трубы за счет теплопроводности можно пренебречь, по сравнению с переносом вызываемым течением жидкости. При сделанных допущениях уравнение теплопроводности примет вид:

$$c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + W(r, z, t), \quad t > 0, \quad r_1 < r < R_1, \quad 0 < z < L, \quad (15)$$

где c – теплоемкость Дж/кг·К; ρ – удельная плотность кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности Вт/м·К; $W(r, z, t)$ – функция тепловых потерь, пропорциональная квадрату модуля напряженности электрического поля в диэлектрике.

Граничные условия для уравнения (15) на стенке внутренней диэлектрической трубы ($r = r_1$), и на металлической стенке ($r = R_1$) при условии, что внутри диэлектрической трубы находится воздух с температурой T_s , имеют вид:

$$\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial r}(r, z, t) = k(T(r, z, t) - T_s), \quad (16)$$

здесь k – коэффициент теплообмена на боковой поверхности трубы; T_s – температура окружающей среды.

На входе в трубу ($z = 0$) задавалась температура входящего потока $T(r, 0, t) = T_0$. Начальное условие по времени $T(r, z, 0) = T_0$.

Решение задачи находилось методом конечных разностей в двумерной области ($r_1 \leq r \leq R_1$ и $0 \leq z \leq L$). Тепловые источники задавались как:

$$W = 0,5 \cdot |E|^2 \sigma. \quad (17)$$

Расчеты проведены для следующих теплофизических параметров направляющей структуры: $\lambda_{\text{среды}} = 0,3$ Вт/м·К; $\lambda_{\text{диэл}} = 0,015$ Вт/м·К – коэффициенты теплопроводности; $\rho_{\text{среды}} = 0,93 \cdot 10^3$ кг/м³; $\rho_{\text{диэл}} = 1,5 \cdot 10^3$ кг/м³ – удельная плотность; $\nu_{\text{среды}} = 135,2 \cdot 10^{-6}$ м²/с – кинематическая вязкость; $k_{\text{мет}} = 50$; $k_{\text{диэл}} = 0,15$ – коэффициент теплообмена; $\sigma_{\text{среды}} = 1$ См/м; $\sigma_{\text{диэл}} = 1 \cdot 10^{-6}$ См/м – проводимость; $R_1 = 0,025$ м – радиус внешней металлической трубы;

$r_1 = 0,015$ м – внутренний радиус диэлектрического обтекателя; $E = 2000$ В/м – напряженность поля в линии; $C_{\text{среды}} = 3000$ Дж/кг·К; $C_{\text{диэл}} = 700$ Дж/кг·К – теплоемкость; $T_s = 20$ °С – температура окружающей среды; $T_0 = 20$ °С – начальная температура обрабатываемой среды; $Q1_{\text{среды}} = 8,3 \cdot 10^{-6}$ м³/с; $Q2_{\text{среды}} = 5 \cdot 10^{-5}$ м³/с – расход обрабатываемой среды.

Результаты расчетов для различных длительностей воздействия приведены на рис. 8. Нарастание температуры к концу линии объясняется равномерным распределением тепловых источников вдоль линии и «сносом» тепла в результате течения обрабатываемой среды.

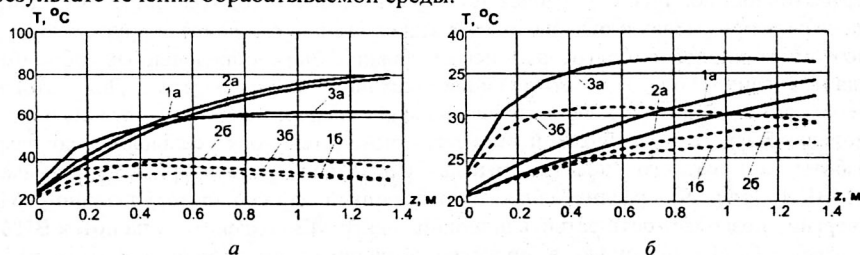


Рис. 8. Распределение температур в направляющей структуре: — — — графики температуры при нагреве в течение 1 мин; — — — в течение 10 минут и больше; кривые 1а, 1б – температура в обтекателе; 2а, 2б – средняя температура нагреваемой среды; 3а, 3б – в слое, прилегающем к стенке трубопровода (расход жидкости: а – $8,3 \cdot 10^{-6}$ м³/с, б – $5 \cdot 10^{-5}$ м³/с)

Результаты расчетов и экспериментов, сделанных на микроволновой установке по разделению водонефтяной эмульсии в трубе для расхода жидкости в канале микроволновой обработки 0,5 л/мин, сведены в табл. 1. При проведении экспериментов температура измерялась на входе и выходе канала обработки.

Таблица 1

Расход,		Время, мин	Температура, °С		
			на входе канала	на выходе канала	
м ³ /с	л/мин			Эксперимент	Расчет
$8,3 \cdot 10^{-6}$	0,5	1	20	35	38
$8,3 \cdot 10^{-6}$	0,5	10	20	85	78

Рассмотренная задача позволяет найти распределение температур при микроволновой обработке потока вещества в отдельных слоях коаксиального канала микроволновой обработки, а именно в обрабатываемом материале и обтекателе линии передачи. Эти параметры необходимы при разработке микроволновых технологических процессов, оценке теплового пробоя обтекателя при проектировании направляющей структуры для конкретного применения.

В четвертой главе рассматривается реализация способа распределения электромагнитной энергии неоднородными открытыми линиями передачи в коаксиальном канале микроволновой обработки.

- Данный способ реализован в двух экспериментальных установках:
- 1) установка для разделения водонефтяных эмульсий в потоке по трубе ЭМВК-1;
 - 2) установка для регенерации силикагеля в осушительных колоннах для газотурбинных двигателей газоперекачивающих станций.

Установка ЭМВК-1 предназначена для физического моделирования процесса разделения водонефтяных эмульсий (ВНЭ) в потоке по трубе. Известно, что этот процесс под действием ЭМ поля характеризуется высокой эффективностью. Физико-химические свойства нефти и водонефтяных эмульсий на разных промыслах и отдельных скважинах сильно отличаются друг от друга, поэтому технология подготовки нефти должна быть определенным образом адаптирована под соответствующие условия производства. Для этого необходимо проведение специальных экспериментов, позволяющих моделировать технологический процесс, применительно к реальным условиям работы конкретного нефтепромысла. Созданная лабораторная установка ЭМВК-1 (рис. 9), реализующая разработанный способ распределения ЭМ энергии, позволяет осуществить широкий спектр МВ воздействия на поток ВНЭ в трубе. С его помощью в процессе экспериментов уточняются частотно-временные параметры электромагнитного воздействия на эмульсию, требуемые

размеры и тип открытой направляющей структуры, что может быть использовано для определения удельных энергетических и экономических затрат процесса очистки нефти.

Установка ЭМВК-1 (рис. 9) собрана по модульной структуре, согласно которой трубопровод выполнен в виде нескольких сменных секций длиной по 1,5 м. Это позволяет осуществлять перестройку установки, адаптируя ее к соответствующим условиям проводимых экспериментов.

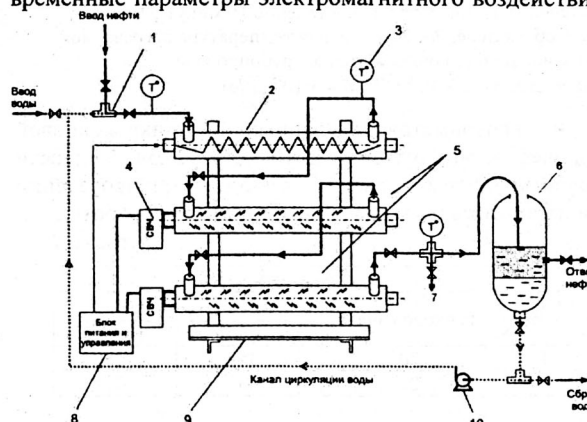


Рис. 9 Схема микроволновой установки, состоящей из: смесителя 1 для подготовки водонефтяной смеси; звена предварительного нагрева 2; электронных термометров 3 для снятия значений температуры в контрольных точках; СВЧ-генераторов 4; звеньев микроволновой обработки 5; накопительной емкости - отстойника 6; точки отбора проб 7; блок питания и управления 8; несущей рамы 9; помпы 10

Проведены лабораторные и полевые испытания установки ЭМВК-1. Лабораторные испытания проводились в лаборатории физико-химических исследований нефти и нефтепродуктов Волжского научно-исследовательского института углеводородного сырья (ВНИИУС).

Эксперименты по обессоливанию и обезвоживанию высоковязкой нефти с большим содержанием смол и асфальтенов показали, что микроволновая обработка потока ВНЭ, произведенная в экспериментальной микроволновой установке, в большинстве случаев позволяет снизить в нефти содержание солей и воды в соответствии с требованием ГОСТ Р 51858-2002 «НЕФТЬ Общие технические условия» по степени подготовки нефти до значений, соответствующих качеству нефти I-й группы (массовая доля воды - не более 0,5%, концентрация хлористых солей - не более 100 мг/дм³).

Другая реализация способа распределения микроволновой энергии осуществлена в установке для регенерации силикагеля в осушительной колонне адсорбционных осушителей газов, позволяющая существенно сократить время регенерации и восстанавливать первоначальные адсорбционные свойства силикагелей и цеолитов. Особенность установки заключается в том, что в ней осуществляется микроволновая обработка адсорбентов, характеризующихся низкой теплопроводностью и большими электромагнитными потерями и находящихся в замкнутой цилиндрической камере. Большие потери, низкая теплопроводность силикагеля и отсутствие его движения в канале обработки требуют для реализации процесса регенерации повышенной равномерности распределения электромагнитной энергии во всем объеме колонны. При этом обеспечивается равно-мерный нагрев всего материала и реализуются все преимущества СВЧ-воздействия, способствующие удалению влаги из гранул силикагеля.

Распределение поля в установке (рис.10) осуществлялось коаксиально-полосковой направляющей структурой (см. рис. 3). С ее помощью было экспериментально получено распределение поля вдоль колонны с равномерностью не хуже $K_p = 0,89$, при этом разброс температуры вдоль колонны при нагреве в течение 40 мин не превышал в контрольных точках 20 °С. Для однородной коаксиальной линии эта неравно-мерность составляет $K_p \approx 0,25$.

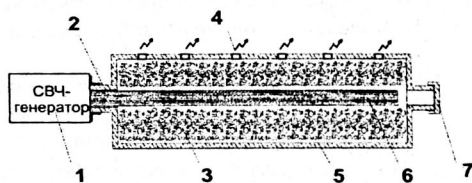


Рис.10. Экспериментальная микроволновая установка для регенерации силикагеля:
1 - источник СВЧ-энергии; 2 - СВЧ-тракт; 3 - силикагель; 4 - отверстия для контроля температуры и напряженности поля; 5 - корпус колонны; 6 - направляющая структура в обтекателе; 7 - заглушка

Проведенные исследования подтверждают эффективность применения способа распределения ЭМ энергии в сыпучих материалах с большими потерями и низкой теплопроводностью открытыми направляющими структурами, на основе коаксиальных линий передачи с сетчатым или перфорированным внешним проводником или с помощью линий типа коаксиально-полосковой структуры.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Главным результатом диссертационной работы является решение важной научно-технической задачи – разработка устройств распределения электромагнитной энергии на основе открытых неоднородных линий передачи, повышающих равномерность распределения электромагнитного поля в коаксиальном канале микроволновой обработки и обеспечивающих повышение эффективности микроволнового воздействия на поток жидких и сыпучих материалов в трубе.

Основные выводы по работе:

1. Предложен способ распределения микроволновой энергии открытыми неоднородными линиями передачи в канале микроволновой обработки с потоком диссипативной среды.
2. Разработана математическая модель распределения электромагнитного поля в многослойном коаксиальном канале микроволновой обработки, учитывающая продольную компоненту электрического поля.
3. На основе решения уравнения теплопроводности проведена оценка теплового воздействия электромагнитной энергии на поток обрабатываемого материала и элементы конструкции коаксиального канала микроволновой обработки для тепловых источников, найденных из решения задачи о распределении электрического поля.
4. Предложенный способ формирования распределения поля реализован в двух экспериментальных микроволновых установках для:
 - 1) разделения водонефтяной эмульсии в потоке по трубе под воздействием микроволновой энергии;
 - 2) регенерации силикагеля в осушительной колонне в технологическом процессе осушки природного газа для газотурбинных двигателей газоперекачивающих станций.
5. Показано, что направляющие структуры на основе открытых неоднородных линий передачи, размещаемые в трубе с потоком диссипативного материала, позволяют снизить неравномерность распределения электромагнитной энергии вдоль канала микроволновой обработки, в зависимости от параметров обрабатываемой среды в 5 - 10 раз по сравнению с существующими устройствами ввода электромагнитной энергии в трубу. Это позволяет значительно повысить эффективность микроволнового воздействия на поток жидких и сыпучих сред в трубе.

IV. СПИСОК РАБОТ, ОТРАЖАЮЩИХ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статья в журнале из перечня ВАК РФ

1. Аюпов, Т.А. Распределение электромагнитных и тепловых полей при микроволновой обработке потока жидкой среды в трубопроводе с многослойной коаксиальной структурой / Т.А. Аюпов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2008. - № 12. – С. 57-61.

Работы, опубликованные в других изданиях

2. Пат. №2234824 РФ, МПК⁷ Н05В 6/64, 6/80, В 08 В 7/04. Способ микроволновой обработки жидкой или сыпучей среды и устройство для его

- осуществления / Воробьев, Н.Г., Аюпов, Т.А.; заявитель и патентообладатель КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2003106020; заявл. 03.03.2003; опубл. 20.08.2004. Бюл. № 23.
3. Пат. №2264052 РФ, МПК⁷ H05B 6/80. Микроволновый нагреватель жидкой или сыпучей среды / Воробьев Н.Г., Аюпов Т.А., Гараев Т.И., Маркунин Е.Н.; заявитель и патентообладатель КГТУ им. А.Н.Туполева. - 2004106381, заявл. 03.03.2004; опубл. 10.11.2005. Бюл. №31.
 4. Пат. №41948 РФ, МПК⁷ H05B 6/64, 6/80, В 08 В 7/04. Микроволновый нагреватель газообразной жидкой или сыпучей среды (Варианты) / Воробьев Н.Г., Аюпов Т.А.; заявитель и патентообладатель КГТУ им. А.Н.Туполева. - № 2004118014, заявл. 17.06.2004; опубл. 10.11.2004. Бюл. №31.
 5. Пат. №67482 РФ, МПК В 08 В 7/04. Устройство для микроволновой обработки водонефтяной эмульсии, транспортируемой по трубопроводу / Воробьев Н.Г., Аюпов Т.А., Даутов О.С., Петров А.В.; заявители и патентообладатели КГТУ им. А.Н.Туполева, ООО «НПЦ «МикроТех». - № 2007115021, заявл. 20.04.2007; опубл. 27.10.2007. Бюл. №30.
 6. Пат. №2333418 РФ, F17D 1/16, B01J 19/08. Способ микроволновой обработки водонефтяной эмульсии, транспортируемой по трубопроводу, и устройство для его осуществления / Воробьев Н.Г., Аюпов Т.А., Даутов О.С., Петров А.В.; заявители и патентообладатели КГТУ им. А.Н.Туполева, ООО «НПЦ «МикроТех». - № 2007108826, заявл. 9.03.2007; опубл. 10.09.2008. Бюл. №25.
 7. Аюпов, Т.А. Формирование электромагнитного поля в средах с потерями открытыми направляющими структурами / Воробьев Н.Г., Аюпов Т.А., Гараев Т.И., Маркунин Е.Н., Дараган М.А. // Электронное приборостроение. Научно-практический сборник / Казань. – 2003. – №5 (33). - С. 111-115.
 8. Аюпов, Т.А. Устройства и методы формирования электромагнитного поля для технологических процессов микроволновой обработки жидких и сыпучих сред на основе открытых изолированных направляющих структур / Н.Г. Воробьев, Т.А. Аюпов //Материалы Международной научно-практической конф. «Авиакосмические технологии и оборудование». – Казань. 2004.
 9. Аюпов, Т.А. Открытые изолированные направляющие структуры и их применение для микроволновой обработки сред в трубопроводе / Т.А. Аюпов, Н.Г. Воробьев // Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции "Физика и технические приложения волновых процессов". - Нижний Новгород. 2005. – С. 244-245.
 10. Аюпов, Т.А. Исследование параметров коаксиальной направляющей структуры в трубопроводе с диссипативной средой / Т.А. Аюпов // Материалы Международной молодежной научной конференции, посвященной 1000-летию г. Казани "Туполевские чтения", 10-11 ноября 2005. – Казань, 2005. – Том IV. - С. 72-73.
 11. Аюпов, Т.А. Формирование электромагнитного поля в среде с потерями открытыми изолированными направляющими структурами / Т.А. Аюпов, Н.Г. Воробьев // Приложение к журналу «Физика волновых процессов и

- радиотехнические системы». Тезисы докладов и сообщений III Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов», Волгоград, 6-12 сент. 2004. - Волгоград, 2004. - С. 269-270.
12. Аюпов, Т.А. Способ микроволновой обработки жидких или сыпучих сред и устройство для его осуществления. Патент РФ №2234824 / Н.Г. Воробьев, Т.А. Аюпов // Бюллетень ежегодного республиканского конкурса среди изобретателей РТ «Лучшее изобретение года». / Казань – 2005, №6 – С. 62.
 13. Аюпов, Т.А. Устройства формирования электромагнитного поля в технологических процессах микроволновой обработки сред на основе открытых изолированных линий передачи / Т.А. Аюпов // Тезисы докладов двенадцатой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика", Москва 2-3 марта 2006. – М., 2006. Т1. – С. 112-113.
 14. Аюпов, Т.А. Анализ открытых изолированных направляющих структур в трубопроводе. / Т.А. Аюпов, Н.Г. Воробьев // Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы». Тезисы и доклады V Международной научно-технической конференции "Физика и технические приложения волновых процессов", 11-17 сентября 2006. – Самара, 2006. – С. 246-247.
 15. Аюпов, Т.А. Устройства и методы формирования распределения микроволновой энергии в трубопроводе / Н.Г. Воробьев, Т.А. Аюпов // Материалы Международной научно-практической конференции «Авиакосмические технологии и оборудование». - Казань, 2006. – С. 359-360.
 16. Аюпов, Т.А. Исследование коаксиальных структур для микроволновой обработки в трубопроводе / Т.А. Аюпов // Материалы Международной молодежной научной конференции «XIV Туполевские чтения». – Казань, 2006. – С. 84-85.
 17. Аюпов, Т.А. Микроволновый нагреватель жидкой или сыпучей среды патент РФ №2264052 / Воробьев Н.Г. Аюпов Т.А, Гараев Т.И., Маркунин Е.Н. // Бюллетень ежегодного республиканского конкурса среди изобретателей РТ «Лучшее изобретение года». – Казань, 2006. - №7. – С. 62-63.
 18. Аюпов Т.А. Распределение микроволновой энергии связными коаксиальными структурами в осушительных колоннах с силикагелем / Т.А. Аюпов // Материалы Международной молодежной научной конференции «XV Туполевские чтения», Казань 9-10 ноября 2007. – Казань, 2007.
 19. Аюпов, Т.А. О распределении электромагнитной энергии продольно-неоднородной коаксиальной структурой в трубопроводе с диссипативной средой. Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / Т.А. Аюпов, Н.Г. Воробьев, О.Ш. Даутов // Тезисы и доклады VI Международной научно-технической конференции "Физика и технические приложения волновых процессов", Казань, 17-21 сентября 2007. - Казань, 2007. – С. 107-108.
 20. Аюпов, Т.А. Лабораторный комплекс для моделирования микроволнового технологического процесса обработки жидкой среды в трубопроводе / Т.А. Аюпов, Н.Г. Воробьев // Приложение к журналу «Физика волновых

- процессов и радиотехнические системы». Тезисы и доклады VI Международной научно-технической конференции "Физика и технические приложения волновых процессов". – Казань, 2007. – С. 263-264
21. Аюпов, Т.А. Разработка и создание экспериментальной микроволновой установки разделения потока водонефтяной эмульсии: Отчет НИР (итоговый) / ООО «МикроТех»: рук. Н.Г. Воробьев, исполнители Т.А. Аюпов, А.В. Бакаев, Е.Г. Воробьева, О.Ш. Даутов, А.В. Петров. – Казань, 2008. – 117 с. - Рег. ВНИИЦ № 01200610603. - Инв. № 0220.0 850020.
 22. Аюпов, Т.А. Микроволновая установка для обезвоживания/обессоливания нефти (разделения стойких водонефтяных эмульсий) / Т.А. Аюпов, Н.Г. Воробьев, А.В. Бакаев // Каталог III казанской венчурной ярмарки. – Казань, 2008. – С. 117.
 23. Аюпов, Т.А. Экспериментальная микроволновая установка для разделения стойких водонефтяных эмульсий / Т.А. Аюпов, Н.Г. Воробьев // Тез. докл. 18-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии «КрыМиКо - 08»". - Крым, Севастополь, Украина, 18-12 сен. 2008. – Крым, 2008. - Т.2. – С. 811-812.
 24. Аюпов, Т.А. Анализ распределения поля коаксиальных структур в трубопроводе для задач микроволновой обработки потока жидкой или сыпучей среды / Т.А. Аюпов // Тез. докл. 18-й Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии «КрыМиКо - 08»". - Крым, Севастополь, Украина, 18-12 сен. 2008. – Крым, 2008. - Т.2. – С. 782-783.
 25. Аюпов, Т.А. Поле в слоистых диссипативных средах между проводящими экранами / Т.А. Аюпов // Современные технологии – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения «АКТО-2008»: Материалы Международной научно-практической конференции. - Казань 12-13 августа 2008. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. - Т.2. - С. 214-217.
 26. Аюпов, Т.А. Экспериментальная установка для обработки жидких сред в трубопроводе / Т.А. Аюпов, Н.Г. Воробьев // Современные технологии – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения «АКТО-2008»: Материалы Международной научно-практической конференции. - Казань 12-13 августа 2008. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. – Т.2. – С. 226-229.
 27. Аюпов, Т.А. О формировании распределения поля открытыми направляющими структурами в трубопроводе с диссипативной средой / Т.А. Аюпов, Н.Г. Воробьев, О.Ш. Даутов, В.А. Осокин // Системы и средства связи телевидения и радиовещания. – 2008. - № 1-2. - С. 92-94.
 28. Аюпов, Т.А. Расчет распределения электромагнитной энергии в неоднородных коаксиальных направляющих структурах для задач микроволнового нагрева / Т.А. Аюпов, О.Ш. Даутов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. № 11-12. – С. 61-71.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 1,25. Усл. печ. л. 1,16. Уч. изд. л. 1,07.
Тираж 100. Заказ M235.

Типография Издательства Казанского государственного
технического университета
420111, Казань, К.Маркса, 10

10